DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.05.009

# 煤炭工业碳中和发展战略构想

**袁亮**

（安徽理工大学，安徽淮南 232001）

**摘要：**煤炭工业发挥着我国能源安全的关键保障作用，是推进“双碳”战略目标实施的重要领域，基于顶层设计视角勾勒煤炭工业碳中和发展战略对助推碳中和目标达成至关重要。本文立足我国基本国情并考虑区域发展实际，从发展理念、预期目标、重点方向等层面出发，系统阐述了煤炭工业碳中和发展的战略构想并明晰了具体实施路径。“差异达峰、协同中和”是煤炭工业及关联行业低碳绿色与高质量发展的主导方针，核心理念即兼顾空间差异，谋求区域协同发展，在坚持“全国一盘棋”的基础上科学划分煤炭能源生产区、煤炭能源应用区、新能源耦合区，进而分区域、分步骤实现“双碳”目标。可按达峰攻坚期、有序优化期、中和达成期3个阶段部署实施过程，从碳减排、碳替代、碳封存、碳循环4个层面细化实施路径，重点突破煤炭智能精准开采与清洁高效利用、煤矿瓦斯全浓度开发利用、废弃矿井抽水蓄能、储能与电力消纳、清洁煤电与碳捕集利用与封存耦合、$CO_2$高效驱替煤层气、$CO_2$生物 / 化工利用、矿山绿色生态修复等应用技术。相关研究可为煤炭工业实现“双碳”战略目标提供参考。

**关键词：**煤炭工业；碳中和；清洁高效利用；煤炭与清洁能源耦合；战略路径

**中图分类号：**X3　　**文献标识码：**A

# Strategic Conception of Carbon Neutralization in Coal Industry

**Yuan Liang**

(Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China)

**Abstract:** The coal industry is crucial for guaranteeing China’s energy security and achieving the carbon peaking and carbon neutralization (i.e., “dual carbon”) goals. Therefore, it is imperative to formulate a carbon neutralization strategy for the coal industry from a top-level design perspective. Considering China’s basic national conditions and regional characteristics, this study elaborates the strategic conception of carbon neutralization of the coal industry from the aspects of development concept, expected goals, and key directions, and clarifies specific implementation paths. Specifically, the core concept is to achieve the “dual carbon” goals by both considering regional disparities and promoting regional coordination; based on an overall planning nationwide, the coal energy production, coal energy application, and new energy coupling zones should be scientifically classified, thus to realize the “dual carbon” goals by region and step. The development concept can be implemented via three stages: peak attainment, orderly optimization, and neutralization attainment, and the implementation path can be detailed as carbon emission reduction, carbon substitution, carbon sequestration, and carbon recycling. Moreover, efforts should focus on breakthroughs in the following applied technologies: intelligent and precise mining and clean and efficient utilization of coal, exploitation and utilization of coal mine gas at full concentration,

**收稿日期：**2023-08-24；**修回日期：**2023-09-21

**通讯作者：**袁亮，安徽理工大学教授，中国工程院院士，研究方向为煤炭碳中和战略、煤炭智能精准开采理论与技术；
E-mail：yuanl_1960@sina.com

**资助项目：**中国工程院咨询项目“我国煤炭行业碳中和发展科学体系及战略路径研究”(2022-XBZD-09)

**本刊网址：**www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

pumped storage of abandoned mines, energy storage and power consumption, coupling of clean coal power with carbon capture, utilization and storage, efficiently replacing of coalbed methane with $CO_2$, $CO_2$ bio/chemical utilization, and green ecological restoration of mines. Relevant research can provide a pioneering and fundamental reference for the coal industry to realize the “dual carbon” goals.

**Keywords:** coal industry; carbon neutrality; clean and efficient utilization; coupling of coal and clean energy; strategic path

## 一、前言

我国已正式提出碳达峰、碳中和（“双碳”）战略目标。长期以来，我国经济社会发展依赖煤炭资源，煤炭成为重要的基础能源与工业原料、可靠的能源保障类型[1,2]。近年来，煤炭在我国能源消费总量中的占比不断下降，但富煤、贫油、少气的能源资源禀赋[3]和新能源尚未可靠替代传统资源的现状[4]都决定了以煤为主的能源结构在短期内难以改变，煤炭仍将是能源供应的“压舱石”“稳定器”。面对碳达峰、碳中和（“双碳”）战略目标，煤炭工业需在满足能源安全的基础上，统筹考虑提质增效、有序减量、技术创新等方面的发展要素。为此，系统梳理相关研究，论证并提出能源密集型工业部门（如煤炭开采洗选、煤制热、煤发电、煤化工、黑色金属冶炼）的“双碳”战略构想和发展目标，明晰煤炭工业细分行业的“双碳”实施路径，对煤炭工业高质量发展、稳健实现全国“双碳”目标具有重要意义。

## 二、煤炭工业碳中和的研究背景和出发点

### （一）“双碳”目标的达成是我国经济社会高质量发展的内在要求

我国的碳排放形势不容乐观，碳减排行动面临诸多挑战。① 产业结构偏“重”，能源结构偏煤，能源利用效率偏低。“双碳”目标下能源结构亟待转型，而我国正处于推进中国式现代化建设的关键时期，短时期内的能源需求将保持刚性增长[5]。② 我国能源相关的碳排放量约为 $1.21\times10^{10}$ t，约占全球能源活动碳排放总量的 1/3；我国人均碳排放量约为 10 t，单位国内生产总值（GDP）碳排放量、人均温室气体排放量、人均碳排放量分别约为全球平均值的 1.8 倍、1.5 倍、1.7 倍[6,7]，已超过一些发达国家。

### （二）煤炭工业是我国实现“双碳”目标的重要领域

煤炭是我国长期的主要能源供应品类，2021 年消费量占能源消费总量的 56.2%[8]，对应的碳排放量占能源领域碳排放总量的 80%，这就决定了我国能源领域的减碳首先聚焦煤炭工业。以煤为主的能源格局在短期内难以改变，在新能源尚未形成安全可靠替代能力的情况下，煤炭仍是我国能源结构中的基础资源，其保障能源安全、维持市场平稳的关键作用难以替代[9]。在推进“双碳”目标的进程中，煤炭工业既承担着能源保供的兜底责任，也以自身的转型升级支撑经济社会绿色发展，成为统筹发展与安全的基础要素。实现“双碳”目标不能弃煤炭不用，煤炭工业减排需要因地制宜，制定科学、特色、可实施、匹配“双碳”目标的战略体系和综合规划。

### （三）煤炭工业碳中和战略研究仍需探索和完善

已有研究探讨了“双碳”目标下煤炭工业高质量发展的相关问题、机遇和挑战，研判了我国能源消费格局的演变情况[10]，认为能源领域“双碳”行动的重点阶段包括能源领域变革期、能源体系养成期、碳中和阶段[11]。当前煤炭行业的发展规划、战略导向等，对照碳中和目标仍存在较大差距，表现在标准规范、监管要求、治理能力、技术研发诸多方面[12]。针对碳中和愿景下“煤炭安全区间”问题及影响因素[13]，研究发现煤炭在未来能源体系下仍可发挥重要作用，在核心保底、优化保底、可控保底情景下的安全区间占比分别为 61.5%、47.1%、43.5%[14]，但面临 $8\times10^{9}$~$1\times10^{10}$ t 的碳减排任务[15]。对于碳中和愿景下煤炭领域相关行业的低碳发展，我国钢铁行业很有可能在“十四五”前期实现碳达峰[16]，控制现代煤化工项目建设规模、挖掘原料替代空间、实施节能技术改造是减少煤化工行业碳排放的重要手段[17]；碳中和地质技术是低碳洁净高效发展的关键支撑，煤矿区或煤炭基地对碳捕集、利用与封存（CCUS）具有迫切需求[18]。煤炭工业碳中和主要依托煤炭开发利用碳中和技术体系、“煤炭+”多能互补零碳 / 负碳技术体系、煤矿区碳汇技术体系[19]。还可推动高耗能产业率先达峰，同步开展产业结构

转型，持续采取降碳、脱碳等相关措施[20]。

针对煤炭工业碳中和战略，已有研究提出的方法和举措具有良好的借鉴价值；但从完备性的角度出发，还可在以下方面进行完善和深化：① 煤炭工业减排需要因地制宜，结合行业特征和区域特征，依据煤炭生产量和消费量对我国区域进行统一划分，在各细分区域进行梯次有序的碳达峰；②“双碳”目标的实现是系统工程，应在能源、产业、经济、社会等领域协同布局，开展一体化部署和行动；③ 具体的减排路径、减排技术等需要进一步研究以明确内涵与进度。煤炭工业碳中和发展需要立足基本国情开展通盘谋划，明确战略定位、转型时间及路线/路径等，本文开展针对性研究，以期答复上述煤炭工业发展关切，亦为相关决策和学术研究提供参考。

## 三、煤炭工业碳中和战略构想

国务院2021年发布的碳达峰行动方案提出，强化顶层设计和各方统筹，采取各地区、各领域、各行业因地制宜、分类施策的工作原则，明确符合自身实际、满足总体要求的目标任务。对于北京、上海、江苏等省份而言，因能源结构多元、产业结构高级、经济较为发达，实现“双碳”目标相对容易。但对于山西省、内蒙古自治区、陕西省等主要能源基地，以化石能源原材料为基础的工业产业是经济支柱，实施经济结构转型的难度较大[21]；如果“一刀切”地执行与其他地区相同的减碳任务，这些地区的经济社会发展将面临较大冲击。因此，“差异达峰、协同中和”是煤炭工业实现“双碳”目标的科学路径。

“差异达峰、协同中和”是本文立足基本国情和总体要求[22]提出的煤炭工业及关联行业低碳绿色与高质量发展的战略构想，其核心理念是兼顾空间差异，谋求区域协同发展，在坚持“全国一盘棋”的基础上科学划分煤炭能源生产区、煤炭能源应用区、新能源耦合区，进而分区域、分步骤实现“双碳”目标；碳减排过程具有跨时间、跨空间、跨要素、跨场景特征，以利于协调各环节主体共同出力、共谋发展；分级管控区域碳排放，激励达峰地区碳排放不再增长、处于平台期且可再生能源丰富的地区尽早达峰。

### （一）区域协调、有序推进

我国各地区的战略定位、发展水平、资源禀赋等有较大的差异性，煤炭能源的生产和消费同样如此。整体来看，新疆、内蒙古、山西、青海、陕西等省份（自治区）的煤炭能源生产量位居全国前列，而北京、上海、江苏、浙江、山东、广东等省市的能源消耗量较高。在能源转型的发展背景下，部分地区正在以更大力度推进“水核风光电”等能源类型的使用。不同省份的煤炭生产与消费存在差异，在相应地区的碳排放能力、碳减排潜力上也会体现，因而可将全国区域划分为煤炭能源生产区（能源生产量<能源消费量）、煤炭能源应用区（能源生产量>能源消费量）、新能源耦合区（新能源消费占比>17.5%）。各地区宜综合考虑自身发展需求、生产力布局、产业结构等，深入实施区域协调发展战略；而在国家层面，统筹制定顶层逻辑一致、兼具差异化的行动方案，构建优势互补、协同有序的煤炭能源布局与空间体系，更好支持煤炭工业“双碳”目标实现。

对于新疆、内蒙古、山西、青海、陕西等主要煤炭能源生产供应地区，在发展特色优势产业、保障国家能源安全的同时，需要优化发展路径，积极采取技术创新、产品替代等方式升级高排放产业；逐步降低对高碳产业的经济依赖，探索建设“风光火储”一体化的综合能源产业基地，持续推进能源转型。对于北京、上海、江苏、浙江、山东、广东等煤炭能源应用地区，需要实施经济社会高质量发展，推动再电气化，实现高耗能、高排放部门的节能增效，促进社会脱碳转型；发挥技术创新优势，发展和应用负排放技术，逐步抵消高额排放，同步开展产业转移并支持能源生产区的产业升级。对于新能源耦合区，继续加快向新能源消费转型，构建新能源利用优化模式，发挥试点和示范效应，引领全国新能源消费转型。

### （二）精准实施、有效协同

实现“双碳”目标是系统工程，应从能源、产业、经济、社会等领域协同布局，以跨时间、跨空间、跨要素、跨场景的形式精准实施“差异达峰、协同中和”举措（见图1）。

在时间和空间方面，煤炭能源的生产、消费、耦合区域差异明显，区际煤炭贸易过程隐含着区域

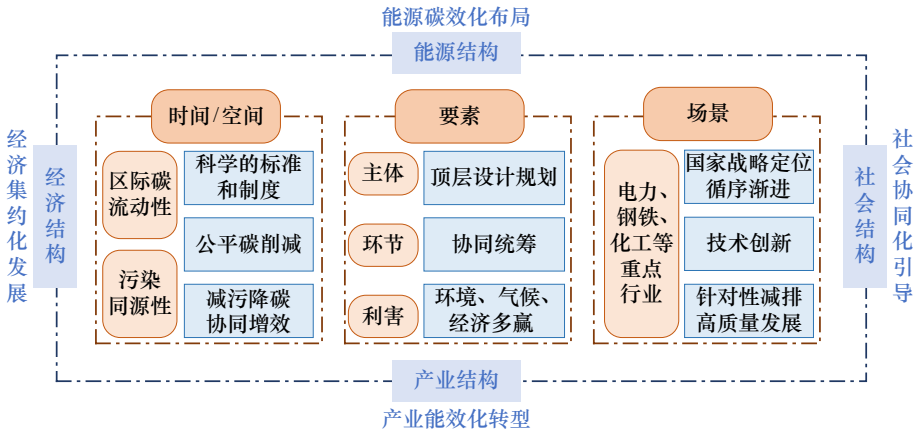


图1　煤炭工业碳中和过程中的多端口协同发力示意图

碳排放转移，需要从区域协同的角度来思考和推动煤炭工业碳中和。把握煤炭生产与消费之间碳排放的流动性特征与流动路径，科学论证并构建标准和制度，精准促进区域间公平且高效地削减煤炭工业碳排放。由煤炭生产、运输、使用产生的环境污染物与温室气体具有高度同源性、排放时空一致性，煤炭的减污与降碳可协同增效，联合改善生态环境。

在要素方面，煤炭工业碳排放的全生命周期涵盖多个主体、多重环节、多种利害，煤炭工业部门需要与政府、社会、上/下游企业等协同，联合开展煤炭清洁开采利用的顶层设计和详细规划，统筹气、水、土壤、固体废物等的减排要求，支持煤炭工业高质量碳达峰，兼顾环境效益、气候效益、经济效益。

在场景方面，煤炭作为我国现阶段的主要能源和原材料，广泛应用于电力、钢铁、化工等重点行业，煤炭工业碳减排必然涉及和影响这些重点行业的运行。在不同重点行业场景的碳中和部署上，应结合国家产业升级战略定位，循序渐进开展煤炭工业碳中和工作；加强相应煤炭应用场景的CCUS技术创新，针对性实施减排措施，确保与重点行业高质量发展相协调。

### （三）分级管控、有的放矢

我国各地区的煤炭开采使用、经济发展、产业结构具有异质性，使碳排放量呈现一定的层级特征；各地区在煤炭消纳能力、产业升级、提质增效等方面的进度不同，表现出差异化的碳达峰进度以及峰值。相关部门应统筹碳中和规划设计，基于科学碳排放预测做好前馈控制，因地制宜并积极构建区域性、低碳化的清洁能源消费与供应系统，分级推进碳达峰和碳中和。

具体来看，已达峰地区需要严格限制排放，确保碳排放量不再增长；碳排放量处于平台期的地区，应实施煤炭清洁高效利用，增强新能源消纳能力，推动煤炭和新能源优化组合，同步发展绿色低碳技术，推进技术成果转化应用；困难达峰的地区应采取相关政策干预、深化低碳发展理念、丰富市场投资、加快产业结构升级、变化对外开放程度等举措，力争尽快达峰。

参照能源生产区、能源应用区、新能源耦合区的划分，重点关注煤炭能源应用区、碳达峰时间偏晚的区域。各省份的碳达峰时间在空间格局上呈南北条带状聚集，需因地因时制宜、分类施策，明确既符合自身实际又满足总体要求的目标任务，从区域、地方层面制定并落实碳达峰行动方案以及配套措施，由此保障全国稳健实现碳中和。

## 四、煤炭工业碳中和战略目标

### （一）达峰攻坚期（2023—2030年）

在这一阶段，稳步发展新能源，积极优化能源结构，将煤炭能源消费占比逐步降至50%左右，非化石能源占一次能源消费的比重超过25%，能源结构调整取得明显进展。实施煤炭清洁利用战略并全面提升利用效率，重点突破绿色智能开采、废弃矿井绿色利用、储能等技术，形成百万吨级CCUS示

范点，确保$CH_4$等非温室气体全浓度利用技术达到国际领先水平。有序淘汰煤电落后产能，在重点用煤行业进行减煤限煤，严格控制煤炭消费量的增长；2030 年煤炭工业碳排放量不再增长，如期实现碳达峰目标，为我国经济社会绿色转型筑牢能源基础。

### （二）有序优化期（2031—2050 年）

在实现碳达峰目标的基础上，持续优化能源结构，继续开展新型电力系统建设，稳步降低煤炭能源的消费占比，将煤电逐步转为保障能源和应急调峰能源；非化石能源消费比重在2030 年的基础上进一步提高，可再生能源占比为30%~50%，形成有利于绿色低碳发展的能源结构新格局。在这一阶段，煤炭工业相关行业逐步实现高端化、多元化、低碳化发展，遏制煤炭高耗能高排放项目，控制煤制油（气）产能规模，确保煤炭工业碳排放总量达峰后的稳中趋降；基本建成煤炭与新能源耦合互补的新型能源体系，在更大范围内应用“煤炭高效燃烧+CCUS”技术，实现“水光风火”多能互补协同发展，全面提升储能、清洁能源消纳等能力。

### （三）中和达成期（2051—2060 年）

在这一阶段，化石能源消费占比进一步降低，煤炭逐步回归原料和备用能源属性，以调峰和工业原料为主要用途；非化石能源占一次能源消费比重超过 80%，成为主体能源类型。2060 年，预计能源消费量为$5\times10^9$~$6\times10^9$ tce，煤炭消费量约为$2.5\times10^8$~$5\times10^8$ t（占能源消费量的 5%~10%）。届时将实现地下“热电气”一体化利用、“水光风火储”一体化发展，新型氢能、核能利用达到国际领先水平；CCUS 负排放技术趋于成熟，实现“减排 – 替代 – 封存 – 循环”的全流程控碳，全面建成智慧能源系统与储能系统、清洁低碳且安全高效的新能源体系。煤炭工业碳排放量达到相对零排放，实现碳中和目标愿景。

## 五、煤炭工业碳中和战略路径

煤炭工业的碳排放集中在开采洗选、运输、加工转换、终端消费等阶段[23]，因而实现“双碳”目标需从供应端、消费端、固碳端出发，聚焦碳减排、碳替代、碳封存、碳循环层面，落实煤炭工业碳中和战略构想，实践煤炭工业碳中和战略路径。积极推进科研平台构建、核心技术攻关、专业人才培养、政策法规制定、碳交易市场建设，以提升碳汇、降低碳源、强化固碳的多措并举方式，切实降低能源强度与碳强度，支持煤炭工业高质量发展。

### （一）碳减排路径——清洁高效开采利用

1. 煤炭智能精准开采与清洁高效利用

以煤为主的能源资源禀赋决定了煤炭安全绿色开采、煤电清洁高效发展是减少煤炭工业碳排放的根本途径。在煤炭开采方面，开展智能精准开采技术攻关及装备研制，建立智慧矿山建设框架及标准体系并推广应用。在煤炭利用方面，推进清洁高效燃煤发电，升级改造燃煤机组，实施“煤改电”电网改造、电能替代；部署煤化工升级改造项目，建设现代煤化工示范项目，促进煤炭精细化工和化工新材料发展；提高煤炭工业废弃物的资源化利用水平，如煤矸石等高附加值产品开发利用、煤炭工业固体废物综合利用等。

论证形成煤化工绿色低碳技术需求清单，及时布局本领域的国家级科技研发项目；面向国内外科研机构加强煤化工技术交流与合作，掌握煤化工技术的示范应用成效，保障煤炭绿色开发和清洁高效利用。亟待攻关的关键科学技术有：智能精准开采关键技术与装备、智能感知与多网融合技术装备、高灵活性智能燃煤发电技术、煤基废弃物资源化利用技术、煤炭定向转化高效催化剂及新工艺、$CO_2$高效活化与定向转化合成强化技术、煤炭利用污染物协同控制技术、煤制新型碳材料的基础理论及技术等。

2. 煤矿瓦斯全浓度开发利用

$CH_4$是煤矿瓦斯的主要成分，属于温室气体，对地球产生的温室效应约为$CO_2$的 26 倍。煤矿瓦斯全浓度开发利用是清洁低碳高效能源系统的有机组成部分、实现碳中和的关键环节之一，但面临着爆炸极限内瓦斯安全引燃与稳定燃烧、熄火和回火时不发生瓦斯爆炸等理论难题，涉及点火困难、点火延迟与燃烧不充分、易熄火及在熄火时发生瓦斯爆炸、易回火及在回火时发生瓦斯爆炸、进气参数波动下瓦斯燃烧的安全稳定、爆炸极限内防点火爆炸 / 防回火 / 防脱火等技术难题。

煤矿瓦斯全浓度开发利用尤其是浓度9%~30%的瓦斯利用，是提高煤炭资源清洁高效利用的重大问题。亟待攻关的关键科学技术有：煤矿瓦斯高效开发利用基础理论、煤矿瓦斯煤化工理论工艺技术、煤矿瓦斯分级分类开发利用技术、低浓度瓦斯蓄热式氧化与乏风氧化技术、废弃矿井煤层气开发与利用技术、煤矿瓦斯输运与利用安全保障系统等。

### （二）碳替代路径——煤炭与清洁能源耦合

1. 废弃矿井抽水蓄能

煤炭与清洁能源耦合发展是减少煤炭工业碳排放的有效途径。煤炭和新能源兼有替代关系和辅助关系，二者优化组合是降低碳排放的最佳路径。实施政策引导、技术创新、产业模式创新，统筹推动煤炭和新能源的协同应用。

废弃矿山是构建“多能互补”新型能源体系的天然基地，建设废弃矿井“抽水蓄能+”多能互补能源子系统，同步发展分布式能源和微型电网工程。分析风电、光伏发电的时空互补特性，优化分布式、集中式能源发电开发策略，将电网结构从传统放射型转变为多端互联网络并进一步转向多层、多级、多环、多态的复杂网络。依托网架结构、能源大数据平台，开展多能互补清洁能源供应中心示范建设，形成“气油水光”多能互补的分布式低碳能源智能电网生态、多能互补清洁能源供应格局，支撑煤炭与新能源的深度耦合发展。

2. 储能与电力消纳

储能与电力消纳是煤炭和清洁能源耦合建设的重要支撑。构建需求导向的新型储能发展机制，立足电源侧、负荷侧灵活性资源现状，把握灵活性资源的潜力挖掘、灵活配置、快速响应等方面的技术需求，发展光伏发电与风电并网主动支撑、柔性直流输电等先进输电技术，抽水蓄能、电化学储能、氢能等多类型储能资源，风光互补与能源综合利用等技术，增强多类型储能协同支撑的新能源消纳和电力电量时空平衡能力。

尤其是注重利用废弃矿井新型储能+生态修复+新能源来驱动能源高质量转型，在矿区废弃矿井建设深地抽水蓄能、深地压缩空气储能、深地电化学储能等能源基地，形成国家级废弃矿井深地“储能云平台”，同步构建废弃矿井的生态修复圈、新能源建设圈、电网服务圈，成为煤炭工业降低碳排放的新型重要途径。

### （三）碳封存路径——煤电+CCUS

1. 清洁煤电与CCUS耦合

清洁煤电与CCUS耦合是推进煤炭工业碳中和的关键技术。燃煤电厂加装CCUS，能够提供稳定清洁低碳电力，充分发挥煤电在电力系统中的调节作用，又可支持燃煤电厂实现近零碳排放。追踪CCUS技术进展及成本收益变化，开展CCUS方向的“产学研”协同，推动“煤电+CCUS”示范项目建设；依托示范项目，深入掌握煤电加装CCUS的运行机理、系统方案、减碳成效。煤炭工业及关联行业需注重提升碳捕集能力，加大碳捕集技术研发投入，追求包括技术、经济、环保、成本在内的综合效益。

2. $CO_2$高效驱替煤层气

发展燃煤电站烟气脱硫除尘净化、$CO_2$驱替煤层气等技术，增强物理固碳能力。开展不同条件（如温度、压力）下$CO_2$驱替瓦斯增产煤层气的数值模拟与试验研究，研制$CO_2$高效驱替煤层瓦斯抽采装置，实施枯竭煤炭田地质封存$CO_2$。提高植被固碳、土壤碳储存等能力，促进非稳定性碳向土壤稳定性碳库转移，降低生态系统碳排放量。

3. $CO_2$生物/化工利用

提升$CO_2$生物/化工利用等能力，将$CO_2$与共反应物转化成目标产物。利用矿区丰富的瓦斯资源，制备$CH_4$等燃料，合成甲醇等化工原材料，有机碳酸酯、可降解聚合物等高附加值化学品。开展煤基纳米炭提升生态碳汇能力、煤矸石提升生态碳汇能力等方面的技术研究。

### （四）碳循环路径——矿山绿色生态修复

固碳增汇是减少煤炭工业碳排放的直接途径，而矿区开采引发的生态系统碳排放问题尤为突出。在煤炭工业及关联行业的固碳增汇过程中，需要基于自然条件、生态系统特征，考虑管理方式的区域异质性，提出更具针对性的矿区碳中和实现策略。在矿区积极开展生态修复固碳增汇，以技术固碳增汇、制度固碳增汇为重点举措，破解资源环境约束的突出矛盾。

注重系统设计，完善绿色资源治理机制，激励

相关主体参与修复过程，推进废弃矿山资源化利用。进一步支持废弃矿山绿色资源开发利用方面的技术研发，建立相关技术的研发、实验、推广基地。充分发挥碳中和地质技术在煤炭工业碳中和进程中的重要作用，如煤系$CO_2$地质碳汇、$CO_2$矿化固定、采空区充填封存等技术。

## 六、结语

煤炭工业是推进“双碳”战略目标实施的重要领域，但目前面临着产业结构偏“重”、能源结构偏煤、能源利用效率偏低的艰巨挑战。本文提出“差异达峰、协同中和”的战略构想，将全国区域划分为煤炭能源生产区、煤炭能源应用区、新能源耦合区，以跨时间、跨空间、跨要素、跨场景的形式，分区域、分步骤精准实施“双碳”进程，激励达峰地区碳排放不再增长、处于平台期且可再生能源丰富的地区尽早达峰。针对煤炭工业碳中和目标，可按达峰攻坚期、有序优化期、中和达成期3个阶段部署实施过程，从碳减排、碳替代、碳封存、碳循环4个层面细化实施路径，重点发展煤炭智能精准开采与清洁高效利用、煤矿瓦斯全浓度开发利用、废弃矿井抽水蓄能、储能与电力消纳、清洁煤电与CCUS耦合、$CO_2$高效驱替煤层气、$CO_2$生物/化工利用、矿山绿色生态修复等应用技术。

为了支持煤炭工业碳中和过程的稳健实施，还需采取以下保障措施：① 人才队伍是行业发展、科技创新的重要支撑，建立科学的煤炭工业人才使用机制，组织运用好各类人才，培养高层次人才，建立青年人才梯队；② 科研平台是凝聚智慧、支撑科研、促进交流的基础条件，建设适应煤炭工业碳中和需求的平台能力，制定激励机制和评价准则，保障重点方向的技术攻关要求；③ 协同包括市场力量在内的多方力量，加快建设碳交易市场，通过市场机制驱动重点行业全面参与煤炭工业碳中和行动。

**利益冲突声明**

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** August 24, 2023; **Revised date:** September 21, 2023

**Corresponding author:** Yuan Liang is a professor from Anhui University of Science and Technology, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include coal carbon neutral development strategy, coal intelligent precision mining theory and technology. E-mail: yuanl_1960@sina.com

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on Scientific System and Strategic Path for Carbon Neutral Development of China’s Coal Industry” (2022-XBZD-09)

**参考文献**

[1] Jia Z J, Lin B Q. How to achieve the first step of the carbon-neutrality 2060 target in China: The coal substitution perspective [J]. Energy, 2021, 233: 121179.

[2] 袁亮. 我国煤炭资源高效回收及节能战略研究 [J]. 中国矿业大学学报 (社会科学版), 2018, 20(1): 3–12.
Yuan L. Strategies of high efficiency recovery and energy saving for coal resources in China [J]. Journal of China University of Mining & Technology (Social Sciences), 2018, 20(1): 3–12.

[3] Jie D F, Xu X Y, Guo F. The future of coal supply in China based on non-fossil energy development and carbon price strategies [J]. Energy, 2021, 220: 119644.

[4] 林伯强. 中国新能源发展战略思考 [J]. 中国地质大学学报 (社会科学版), 2018, 18(2): 76–83.
Lin B Q. Strategic consideration of new energy development in China [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2018, 18(2): 76–83.

[5] 周宏春. 中国低碳经济发展现状及展望 [J]. 科技导报, 2022, 40(21): 6–12.
Zhou H C. Current situation and prospect of low carbon economy development in China [J]. Science & Technology Review, 2022, 40(21): 6–12.

[6] 洪圣光, 赵秀青, 邹泽宇. “双碳”目标下碳排放量变化趋势及影响因素分析——以长沙市碳排放为例 [J]. 可持续发展, 2023, 13(2): 675–682.
Hong S G, Zhao X Q, Zou Z Y. Analysis of changing trend and influencing factors of carbon emission under the “double carbon” target: A case study of carbon emission in Changsha City [J]. Sustainable Development, 2023, 13(2): 675–682.

[7] 苏健, 梁英波, 丁麟, 等. 碳中和目标下我国能源发展战略探讨 [J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1001–1009.
Su J, Liang Y B, Ding L, et al. Research on China’s energy development strategy under carbon neutrality [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1001–1009.

[8] 2021年我国原煤产量达41.3亿吨 [N]. 中国煤炭报, 2022-01-01 (03).
China’s raw coal production will reach 4.13 billion tons in 2021 [J]. China Coal News, 2022-01-01 (03).

[9] “双碳”进程中煤炭发展战略问题研究 [EB/OL]. (2023-05-26) [2023-08-15]. https://www.cpnn.com.cn/news/baogao2023/202305/t20230524_1603700.html.
Research on coal development strategy in the process of “dual carbon” [EB/OL]. (2023-05-26)[2023-08-15]. https://www.cpnn.com.cn/news/baogao2023/202305/t20230524_1603700.html.

[10] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197–2211.
Xie H P, Ren S H, Xie Y C, et al. Development opportunities of the coal industry towards the coal of carbon neutrality [J]. Journal

of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197–2211.

[11] 谢克昌. 面向2035年我国能源发展的思考与建议 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 1–7.
Xie K C. China's energy development for 2035: Strategic thinking and suggestions [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 1–7.

[12] 陈浮, 于昊辰, 卞正富, 等. 碳中和愿景下煤炭行业发展的危机与应对 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1808–1820.
Chen F, Yu H C, Bian Z F, et al. How to handle the crisis of coal industry in China under the vision of carbon neutrality [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1808–1820.

[13] 刘峰, 林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1–15.
Liu F, Lin F, Zhao L Z. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background [J]. Joural of China Coal Society, 2022, 47(1): 1–15.

[14] 陈浮, 王思遥, 于昊辰, 等. 碳中和目标下煤炭变革的技术路径 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1452–1461.
Chen F, Wang S Y, Yu H C, et al. Technological innovation paths of coal industry for achieving carbon neutralization [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1452–1461.

[15] 贺克斌院士: 中国实现碳中和与清洁空气的协同路径 [EB/OL]. (2023-02-25)[2023-08-15]. http://www.hitech.ac.cn/gd/202303/t20230328_737657.htm.
Academician He Kebin: A collaborative path to carbon neutrality and clean air in China [EB/OL]. (2023-02-25)[2023-08-15]. http://www.hitech.ac.cn/gd/202303/t20230328_737657.htm.

[16] 薛英岚, 张静, 刘宇, 等. "双碳"目标下钢铁行业控煤降碳路线图 [J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4392–4400.
Xue Y L, Zhang J, Liu Y, et al. Roadmap of coal control and carbon reduction in the steel industry under the carbon peak and neutralization target [J]. Environmental Science, 2022, 43(10): 4392–4400.

[17] 张鸿宇, 王媛, 郝成亮, 等. 双碳约束下煤化工行业节煤降碳减污协同 [J]. 环境科学, 2023, 44(2): 1120–1127.
Zhang H Y, Wang Y, Hao C L, et al. Coal-carbon-pollutant coordinated control of coal chemical industry under carbon peak and carbon neutrality constraints [J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 1120–1127.

[18] 桑树勋, 袁亮, 刘世奇, 等. 碳中和地质技术及其煤炭低碳化应用前瞻 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1430–1451.
Sang S X, Yuan L, Liu S Q, et al. Geological technology for carbon neutrality and its application prospect for low carbon coal exploitation and utilization [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1430–1451.

[19] 谢和平, 刘涛, 吴一凡, 等. $CO_2$的能源化利用技术进展与展望 [J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 145–156.
Xie H P, Liu T, Wu Y F, et al. Progress and prospect of $CO_2$ energy utilization technology [J]. Advanced Engineering Science, 2022, 54(1): 145–156.

[20] 杜祥琬院士: 实现双碳是系统工程, 既要防一刀切也要防转型不力 [EB/OL]. (2023-06-12)[2023-08-15]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_23451328.
Academician Du Xiangwan: Achieving dual carbon is a system engineering, which must prevent both one-size-fits-all and ineffective transformation [EB/OL]. (2023-06-12) [2023-08-15]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_23451328.

[21] 毛显强, 郭枝, 高玉冰. 碳达峰、碳中和与经济、社会、生态环境的协同研究 [J]. 环境保护, 2021, 49(23): 30–35.
Mao X Q, Guo Z, Gao Y B. The synergy between carbon peak, carbon neutrality and economy, society and ecological environment [J]. Environmental Protection, 2021, 49(23): 30–35.

[22] 李涛. 积极稳妥推进碳达峰碳中和 [J]. 红旗文稿, 2023 (6): 40–43.
Li T. Actively and steadily promote peak carbon dioxide emissions carbon neutrality [J]. Red Flag Manuscript, 2023 (6): 40–43.

[23] 李姗姗, 袁亮. 煤炭工业全生命周期碳排放核算与影响因素 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2925–2935.
Li S S, Yuan L. Carbon emission accounting and influencing factors for whole life cycle of coal industry [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2925−2935.